

(NASA-TM-111095) RADIATION IN THE
UNIVERSE (NASA. Marshall Space
Flight Center) 18 p

N96-13348

Unclas

G3/93 0067479

RÖNTGENSTRAHLEN AUS DEM UNIVERSUM

von

p-18

Ernst Stuhlinger, Huntsville, Alabama, USA

Joachim Trümper, Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik, Garching, Germany

Martin Weisskopf, NASA-George C. Marshall Space Flight Center, Huntsville, Alabama, USA

Einer der Autoren (E. St.) wurde im Jahre 1970 von der Deutschen Röntgengesellschaft eingeladen, aus Anlaß des 75-jährigen Jubiläums von Röntgens Entdeckung der Röntgenstrahlen einen Vortrag über „Röntgenastronomie“ zu halten (Stuhlinger 1970). Während jener Vortrag über Einzelheiten der Röntgenphysik und der Entdeckung kosmischer Röntgenstrahlen berichtete, beschreibt der vorliegende Aufsatz vor allem den ungeheuren Fortschritt, den unser Wissen und unser Verständnis während der vergangenen 25 Jahre auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen aus dem Universum gemacht haben.

RÖNTGENSTRAHLEN IN IRDISCHEN LABORATORIEN

Abstract Als Wilhelm Conrad Röntgen seine Strahlung vor hundert Jahren entdeckte, schien es, daß er auf eines der seltensten und flüchtigsten Mitglieder der Familie der Grundbausteine unserer natürlichen Welt gestoßen war. Heute berichten die Kosmologen, daß ein wesentlicher Teil der gigantischen Strahlungsenergie im Weltall aus Röntgenstrahlen besteht, die die kosmischen Räume mit Lichtgeschwindigkeit durchheilen.

Röntgen erzeugte seine Strahlen in gasgefüllten Glasröhren, sogenannten Kathodenstrahl-Röhren, in denen er elektrische Entladungen unterhielt. Er nannte die neu entdeckten Strahlen „X-Strahlen“, aber in Deutschland bürgerte sich rasch die Bezeichnung „Röntgenstrahlen“ ein. Es zeigte sich bald, daß Röntgenstrahlen immer dann entstehen, wenn Elektronen hoher Geschwindigkeit sehr rasch abgebremst werden. Physiker vermuteten bald, daß diese neue Strahlung aus elektromagnetischen Wellen besteht, ähnlich den Wellen, die von Quellen sichtbaren oder ultravioletten Lichtes ausgesandt werden, doch konnte die Wellennatur der Röntgenstrahlen erst Jahre später experimentell bewiesen werden: Im Jahre 1912 hatte Max von Laue die glänzende Idee, Kristalle mit ihren regelmäßig geschichteten Atomlagen als Beugungsgitter für Röntgenstrahlen zu benutzen. Er zeigte, daß diese Strahlung Beugungs- und Interferenzeffekte erzeugt, ähnlich denen des sichtbaren Lichts, aber mit tausendmal kürzeren Wellenlängen. Gleichzeitig erwies sich seine Idee nicht nur für das weitere Studium von Röntgenstrahlen als äußerst nützlich, sondern auch für weite Gebiete der Kristallographie und der Materialkunde.

Der nahe Zusammenhang zwischen der Abbremsung von Elektronen und der Erzeugung elektromagnetischer Strahlung kann aufgrund der Maxwell'schen Gleichungen verstanden werden. Zusammen mit den von Laue'schen Beobachtungen führte dies zu dem Schluß, daß Röntgenstrahlen einen Ausschnitt darstellen aus dem großen Spektrum elektromagnetischer Strahlungen, das mit Radiowellen sehr großer Wellenlängen beginnt und sich über Mikrowellen, Wärmestrahlungen, infrarotes, sichtbares und ultraviolettes Licht, Röntgenstrahlen und schließlich Gammastrahlen erstreckt. Die Eigenschaften jeder dieser Strahlungen ist eindeutig durch die Frequenz ihrer elektromagnetischen Schwingungen bestimmt.

Während sich die Röntgenstrahlen sehr rasch als ein äußerst interessantes Phänomen für Physiker erwiesen, waren die Hauptnutznieser ihrer Entdeckung die Ärzte, und noch mehr deren Patienten. Es wurde geschätzt, daß durch Röntgenstrahlen schon mehr Leben gerettet werden konnten, als in sämtlichen Kriegen geopfert wurden! Kaum weniger wichtig waren die Anwendungen bei der Materialprüfung und der Werkstofftechnik.

DIE BEOBACHTUNG VON RÖNTGENSTRAHLEN AUS DEM WELTRAUM

Von der Sonne wußte man seit den dreißiger Jahren, daß sie von einer heißen Hülle, der Korona, umgeben ist und die extrem kurzwellige Ultraviolett- und Röntgenstrahlung aus dieser Schicht wurde für die Ionisation der obersten Atmosphärenschicht unserer Erde, der Ionosphäre, verantwortlich gemacht. Aber direkt nachweisen konnte man diese Strahlung nicht, da die Erdatmosphäre für sie völlig undurchlässig ist. Dann, um die Mitte unseres Jahrhunderts, begann die Menschheit zum ersten Mal über die engen Bezirke ihrer irdischen Umgebung hinauszugreifen und die schützende Lufthülle zu verlassen. Nur Raketenfahrzeuge sind in der Lage, in die weiten Räume jenseits unserer Atmosphäre vorzudringen. Während die ersten großen Raketen für lange Reichweiten unter militärischer Leitung und deshalb als potentielle Waffen entwickelt wurden, war es von Anfang jener Entwicklungen an klar, daß die gleichen Raketen auch in der Lage sein würden, wissenschaftliche Instrumente und sogar Menschen zu tragen, selbst zu Höhen, die weit über den äußersten Grenzen unserer Atmosphäre liegen - in fernerer Zukunft sogar zum Mond und zu einigen der Planeten.

Am Ende des Zweiten Weltkrieges beschloß die amerikanische Armee, eine Anzahl der in Peenemünde entwickelten A-4-Raketen (auch V-2 genannt) in die Vereinigten Staaten zu bringen, in erster Linie, um dem Militär und auch der amerikanischen Industrie die Gelegenheit zu geben, etwas über die neue Raketentechnik zu lernen. Im Sommer und Herbst 1945 wurden Teile von etwa einhundert A-4-Raketen von Deutschland nach White Sands in Neu Mexiko verfrachtet, einem von der Armee betriebenen Prüfplatz für Artillerie und Raketen. Etwa 70 vollständige A-4-Raketen konnten in White Sands

zusammengebaut und abgeschossen werden. Trotz der äußerst rauen Behandlung, die die Raketenteile während ihres langen und beschwerlichen, oft auch abenteuerlichen Weges aus dem vom Krieg verwüsteten Deutschland in die Wüste von White Sands ertragen mußten, erreichten die meisten der abgeschossenen Raketen Höhen von 100 km und mehr.

Einige junge Wissenschaftler in Amerika erkannten die einzigartige Gelegenheit, mit diesen Raketen wissenschaftliche Instrumente in große Höhen zu transportieren und Beobachtungen jenseits der Atmosphäre durchzuführen. Während A-4-Raketen als Waffen im Krieg nur über eine Zeitspanne von einem halben Jahr benutzt wurden, dienten sie in White Sands der Forschung über einen Zeitraum von mehr als sechs Jahren, bis 1952.

NACHWEISMETHODEN FÜR RÖNTGENSTRAHLEN

Röntgenstrahlen sind für das menschliche Auge unsichtbar, aber sie können mit mehreren Methoden nachgewiesen werden. Röntgen bekam die ersten Anzeichen der neuartigen Strahlung aus seiner Entladungsröhre, weil eine in der Nähe liegende chemische Substanz, Barium-Platin-Cyanid, eine schwache grünliche Fluoreszenz zeigte, wenn sie den Strahlen ausgesetzt wurde. Wenig später bemerkte er, daß photographische Platten auf Röntgenstrahlen ähnlich wie auf Lichtstrahlen - durch Schwärzung - reagierten. Mehrere Jahre später, nachdem Hans Geiger sein Geiger-Zählrohr zum Nachweis von Teilchenstrahlungen erfunden hatte, wurde festgestellt, daß Geiger-Zähler auch auf Röntgenstrahlen ansprechen, besonders, wenn sie mit dünnen Eintrittsfenstern versehen waren. Noch besser eignen sich die den Geiger-Zählern verwandten „Proportionalzähler“, in denen die Energie der Röntgenquanten gemessen werden kann, und neuerdings Röntgendetektoren auf Halbleiterbasis.

RÖNTGENSTRAHLEN VON DER SONNE

Die ersten Beobachtungen von Röntgenstrahlen von der Sonne wurden von T.R. Burnight gemacht, der photographische Platten, durch dünne Berylliumfolien geschützt, am 5. August 1948 der Sonnenstrahlung aussetzte auf einem A-4-Flug, der eine Höhe von 168 km erreichte. Richard Tousey, der speziell ausgewählte Phosphore und entsprechende Filter benutzte, konnte auf zwei A-4-Flügen 1949 und 1950 das ganze ultraviolette Spektrum überdecken bis herab zu weichen Röntgenstrahlen von 0,8 Nanometer Wellenlängen (ein Nanometer ist ein millionstel Millimeter). Genauere Daten über solare Röntgenstrahlen wurden im September 1949 von Herbert Friedman und seinen Mitarbeitern erhalten; sie benutzten Geiger-Zähler mit verschiedenen Fenstern und Gasfüllungen. Dieses Experiment war besonders erfolgreich; es bewies, daß die berühmte E-Region der Ionosphäre durch Röntgenstrahlen aus der Sonne erzeugt und aufrechterhalten wird (Friedman 1990).

In den fünfziger Jahren berechnete der Tübinger Astrophysiker Gerhard Elwert das Röntgenspektrum der Sonnenkorona und sagte die Randaufhellung der solaren Röntgenemission voraus. Die Bestätigung dieser Theorie kam im Jahre 1960, als die erste Aufnahme der Sonne im Röntgenlicht während des Fluges einer Aerobee-Rakete gelang. Diese trug eine sehr primitive Lochkamera, deren Öffnung mit einer dünnen Metallfolie überdeckt war, um ultraviolette und sichtbares Licht abzuhalten. Das erste Sonnenbild im Röntgenlicht ließ erkennen, daß Röntgenstrahlen vorwiegend vom Rand und von lokalisierten Regionen höherer Dichte in der Korona emittiert werden.

Ein wesentlicher Fortschritt gegenüber der Lochkamera ergab sich durch den Einsatz von Fresnel'schen Zonenplatten als abbildendes Element. Diese wurden in den sechziger und siebziger Jahren von einer Wissenschaftler-Gruppe am Astronomischen Institut der Universität Tübingen unter Leitung von G. Möllenstedt und Mitwirkung von G. Elwert auf Skylarkraketen für Abbildungen der Sonnenkorona zum Einsatz gebracht. Allerdings waren die Durchmesser dieser „Objektive“ auf wenige Millimeter begrenzt und eigneten sich nicht für Beobachtungen der relativ schwachen kosmischen Röntgenquellen. Weit bessere Möglichkeiten ergaben sich aufgrund einer Erfindung des deutschen Physikers Hans Wolter in Kiel. Man wußte bereits seit langem, daß Röntgenstrahlen von Spiegelflächen unter äußerst kleinen Reflexionswinkeln reflektiert werden. Die einfachste Optik, ein Parabolspiegel, zeigt allerdings unter den Bedingungen des streifenden Einfalls extreme Bildfehler. Diese können korrigiert werden, und dies war die Idee von Wolter, wenn man hinter den Parabolspiegel einen Hyperbolspiegel setzt, an dem die Strahlen ein zweites Mal reflektiert werden (Wolter 1952). Ein Spiegelsystem dieser Art kann Röntgenbilder mit einer Auflösung von einigen Bogensekunden liefern. Die ersten Röntgenbilder von der Sonne mit Hilfe eines „Wolter-Teleskops“ wurden von Giacconis' Gruppe im Jahre 1965 gemacht. Ihnen folgten wesentlich bessere Bilder in den siebziger Jahren, die mit Wolter-Teleskopen auf der großen Skylab-Raumstation gemacht wurden. Drei Mannschaften von je drei Astronauten lebten an Bord des Skylab für 171, 59, und 84 Tage; sie beobachteten die Sonne ohne Unterbrechung über eine Zeit von neun Monaten. Die Wolter-Bilder zeigten, daß das heiße Plasma der Korona in Magnetfeldern gefangen ist, in sogenannten magnetischen Flußröhren, die ihren Ursprung in der Photosphäre haben, und auch dort wieder enden.

Im August 1991, achtzehn Jahre nach Skylab, begann der gemeinsam von Japan, den U.S.A. und Großbritannien gebaute Yohkoh („Sonnenstrahl“) Satellit (Abb. 1), eine reiche Ernte von hochaufgelösten Röntgenbildern der Sonne zu bringen (Petersen 1993). Im Laufe von zwei Jahren machte er über eine Million Sonnenbilder; sie zeigten, daß die „solar flares“ (Sonneneruptionen) dann entstehen, wenn sich zwei der plasmagefüllten magnetischen Flußröhren innerhalb der äußerst turbulenten Sonnenkorona berühren, und sich dabei ihre magnetischen Flußlinien vermischen. Ähnlich wie bei der Berührung zweier elektrischer Drähte entsteht dabei ein „magnetischer Kurzschluß“ mit der explosionsartigen Freisetzung von Energie, die bei großen Flares dem Energiebetrag von einer Milliarde nuklearer Explosionen von je einer Megatonne TNT-Äquivalent gleichkommen kann. Solche Ereignisse tragen zur Aufheizung der Korona bei, und damit zu einer starken Emission von Röntgenstrahlen. Zwei

von Yohkoh aufgenommene Röntgenbilder (Abb. 2a und 2b) zeigen die Sonne in einer aktiven und einer ruhigen Periode.

RÖNTGENSTRAHLEN AUS QUELLEN AUßERHALB DES SONNENSYSTEMS

Röntgenstrahlen von extra-solaren Quellen wurden erstmalig 1962 von Riccardo Giacconi und seinen Mitarbeitern entdeckt. Sie versuchten damals, mit raketengetragenen Geiger-Zählrohren solare Röntgenstrahlen nachzuweisen, die vom Mond reflektiert wurden. Dafür waren jedoch diese Instrumente viel zu unempfindlich, und erst im Jahre 1990 konnte der deutsche Röntgensatellit ROSAT die ersten Röntgenbilder vom Mond machen (Abb. 3). Stattdessen fanden Giacconi et al. eine starke Röntgenquelle nahe dem Zentrum unserer Milchstraße im Sternbild Skorpion (Giacconi et al 1962). Von dieser Quelle stellte man später fest, daß es sich um einen Neutronenstern in einem Doppelsternsystem handelt, der Materie von seinem Begleiter ansaugt. Daneben wurde in diesem Pionier-Experiment ein diffuser Röntgenhintergrund gefunden. Dessen Intensität war jedoch geringer, als man nach der Theorie der „continuous creation“, die von Hermann Bondi, Thomas Gold und Fred Hoyle für die Entwicklung des Universums vorgeschlagen worden war, erwarten würde. Diese Entdeckung wurde dann bald zu einer starken Stütze für die konkurrierende Theorie des „Big Bang“ (Urknall). Erst mit ROSAT ist es gelungen, die Natur des Röntgenhintergrundes weitgehend zu enträtseln.

Die sechziger und siebziger Jahre sahen ein fast explosives Anwachsen von Entdeckungen der Röntgen-Astronomen. Dieses Feld wurde bald eines der am raschesten wachsenden Gebiete wissenschaftlicher Forschung. Etwa 60 diskrete Röntgenquellen waren bis zum Jahre 1970 entdeckt worden, die meisten innerhalb der galaktischen Ebene und offenbar Mitglieder unseres eigenen Milchstraßensystems, aber einige von ihnen lagen auch in hohen nördlichen oder südlichen Breiten.

RÖNTGENSATELLITEN

Der Wunsch, die Himmelskugel systematisch nach Röntgenquellen zu durchsuchen, führte zum Bau von Röntgensatelliten mit großflächigen Detektoren. Der erste Satellit dieser Art, UHURU, wurde von Giacconi und seinen Mitarbeitern gebaut und von einer Ölbohrungsplattform nahe der Küste von Kenya im Dezember 1970 in einen äquatorialen Orbit gebracht (Giacconi et al 1971). Er war mit Proportionalzählern ausgestattet, die durch vorgeschaltete Kollimatoren die Ermittlung der Einfallsrichtung der Röntgenstrahlung erlaubte. Zur Orientierung am Himmel dienten Stern- und Sonnensensoren. Während seiner dreijährigen Lebenszeit entdeckte UHURU 339 diskrete

Röntgenquellen. Viele dieser Quellen konnten mit bekannten sichtbaren Sternen oder mit anderen Objekten des Himmels identifiziert werden.

In den frühen siebziger Jahren begann eine Gruppe junger Astronomen unter der Leitung eines der Autoren (J. T.) am Astronomischen Institut Tübingen mit einem Programm röntgenastronomischer Forschung, das ab 1975 am Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik (MPE) gemeinsam mit Tübingen fortgesetzt wurde. Diese Aktivitäten sollten sich als äußerst fruchtbar erweisen. Ballongetragene Sensoren mit dem Namen HEXE erlaubten 1976 erstmals die direkte spektroskopische Messung des gigantischen Magnetfeldes eines Neutronensterns (Trümper et al, 1978). Über 10 Jahre später wurde der HEXE-Detektor auf der russischen Raumstation MIR eingesetzt und damit die Röntgenstrahlung von der berühmten Supernova 1987A entdeckt, nur 5 Monate nach ihrem Ausbruch.

Zur ergiebigsten Quelle unseres Wissens über Röntgenstrahlen aus der Tiefe des Universums vor dem Jahre 1990 wurde das HEAO-Satellitenprogramm (High Energy Astronomical Observatory). HEAO-1 wurde von einer Atlas-Centaur Rakete im August 1977 in den Orbit gebracht. Es besaß u.a. eine große, von Friedman und seinen Mitarbeitern gebaute Anordnung von Proportionalzählern und lieferte Daten für einen Röntgenkatalog, der 840 einzelne Röntgenquellen enthielt (Abb. 4). HEAO-2, von Giacconi und seinen Mitarbeitern gebaut, wurde später Einstein Observatory getauft. Es wurde 1978 in den Orbit gebracht und trug einen Wolter-Spiegel mit einer Brennweite von 3,44 Meter und einer Auflösung von 10 Bogensekunden (Giacconi et al 1979). Das Einstein-Teleskop war mit zwei verschiedenen Bilddetektoren ausgerüstet: einer Anordnung von abbildenden Proportionalzählern, und einem „Multi-Channeltron“, das aus Millionen von feinen, parallelen Glaskapillaren bestand. Einfallende Röntgenstrahlen lösen Lawinen von Elektronen entlang den Wänden der Kapillaren aus und führen so zu einem Bild der Röntgenquelle. Während HEAO-1 vorwiegend einen Überblick über die Verteilung der hellen Röntgenquellen am Himmel lieferte, zeigte HEAO-2 eine Menge von Einzelheiten dieser Objekte und stieß zu hundertmal schwächeren Quellen vor.

Im Verlauf der achtziger Jahre verlagerte sich dann der Schwerpunkt der Röntgenastronomie nach Europa und Japan. 1983-86 war der EXOSAT der ESA im Orbit, der zwei Wolter-Teleskope und großflächige Detektoren mit Kollimatoren besaß. Die besondere Stärke von EXOSAT war der hochexzentrische Orbit mit einem erdfernsten Punkt in 400 000 km Entfernung. Damit war es erstmals in der Röntgenastronomie möglich, lange ununterbrochene Beobachtungen einzelner Quellen auszuführen - mit bis zu 60 Stunden Länge! Japan beeinflusste den Gang der Röntgenastronomie mit einer Serie von vier kleineren Satelliten, die seit 1979 in fast ununterbrochener Serie viele interessante Ergebnisse, vor allem über Neutronensterne, erbracht haben.

ROSAT - EIN DEUTSCHES RÖNTGENOBSERVATORIUM

Vorgeschlagen vom Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik (MPE) und realisiert unter wissenschaftlicher Leitung und aktiver Mitwirkung der Röntgenastronomiegruppe dieses Instituts hat ROSAT in den letzten Jahren die Röntgenastronomie revolutioniert. Sein Hauptinstrument ist ein Röntgenteleskop mit vier ineinander geschachtelten Wolter-Spiegelsystemen, das fast eine Tonne wiegt. Es besitzt eine Winkelauflösung von 3.5 Bogensekunden und verfügt über zwei Röntgenbildwandler in der Fokalebene, die im Energiebereich 0.1-2.5 keV (entsprechend Wellenlängen 0,5-12.4 nm) arbeiten. Einer der Detektoren ist ein Vieldrahtproportionalzähler (PSPC) aus dem Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik, der es gestattet, vier "Röntgenfarben" aufzulösen. Seine Winkelauflösung beträgt 25 Bogensekunden. Der zweite Detektor ist ein amerikanischer Multi-Channeltron-Detektor (HRI), der "Schwarz-Weiß-Bilder" mit 5 Bogensekunden Auflösung macht.

Neben dem Röntgenteleskop gibt es an Bord ein kleineres Extrem-Ultraviolett-Teleskop, das von einem englischen Konsortium gebaut wurde und das den ROSAT-Energiebereich zu kleineren Photonenenergien hin erweitert (0.03-0.1 keV). Eine detaillierte Beschreibung der Instrumente und des Satelliten findet sich in den Physikalischen Blättern (Trümper 1990). Abb. 5 zeigt eine Abbildung von ROSAT, der am 1. Juni 1990 mit einer amerikanischen Delta II-Rakete gestartet wurde.

Eines der wichtigsten Ziele von ROSAT war, zum ersten Mal mit einem abbildenden Röntgenteleskop den ganzen Himmel zu durchmustern. Dieser Teil der Mission dauerte nur ein halbes Jahr und konnte im Februar 1991 erfolgreich abgeschlossen werden. Dabei konnten Quellen erfaßt werden, deren Intensität hundertmal schwächer waren als die schwächsten Quellen bisheriger Röntgensurveys. Entsprechend reich ist die wissenschaftliche Ausbeute:

Die vorläufigen Auswertungen lassen erwarten, daß dabei mehr als 60.000 Röntgenquellen registriert und lokalisiert wurden (Abb. 6) - ein Quantensprung im Vergleich mit dem bisher umfangreichsten "all sky survey", der mit dem HEAO-1 Satelliten gemacht wurde und 840 Quellen ergab. Zu den neuentdeckten Quellen gehören fast alle bekannten Arten astrophysikalischer Objekte von den nahen Sternen bis zu den Quasaren am Rande des beobachteten Universums. Vielleicht noch wichtiger als der quantitative Fortschritt jedoch ist der Gewinn an Qualität. Abb. 7 zeigt ein kleines Stück ($\approx 1\%$) des ROSAT-Himmels in der Nähe des galaktischen Zentrums im Detail. Man erkennt neben den hellen Quellen, bei denen es sich um Röntgendoppelsterne handelt, viele schwache Objekte, vorwiegend normale Sterne. Rechts im Bild ist eine berühmte Supernovaexplosionswolke zu sehen. Sie stammt von Keplers' Nova" (1604) und ist die letzte Supernova in unserer Milchstraße, die mit bloßem Auge gesehen wurde. Daneben erkennt man im Bild weiträumige Strukturen diffuser Emission, die vom

heißen interstellaren Gas herrühren, das durch Supernovaexplosionen geheizt wird und eine Temperatur von etwa einer Million Grad besitzt. Einige hellere "Fetzen" diffuser Emission dürften Überbleibsel von sehr alten Supernovaexplosionswolken sein. Mit ROSAT ist zum ersten Mal die direkte Abbildung der diffusen Emission des heißen interstellaren Mediums ermöglicht worden.

Im Anschluß an die Himmelsdurchmusterung, also während der letzten drei Jahre, ist der Satellit für Detailbeobachtungen einzelner Quellen eingesetzt worden. Die Beobachtungszeit wird dabei, wie in der Astronomie üblich, ausgeschrieben und verteilt sich auf viele Gastbeobachter. Insgesamt wurden bisher etwa mehr als 4.000 Einzelbeobachtungen ausgeführt. Auch in diesem Teil der Mission bringt ROSAT wesentliche Verbesserungen im Vergleich mit seinen Vorgängern und zwar hinsichtlich der Empfindlichkeit, der Winkelauflösung, der spektralen Bildauflösung und vor allem hinsichtlich des Detektorrauschens. Abb.2 zeigt als Beispiel das erste Röntgenbild des Mondes. Es wurde im Juli 1990 mit ROSAT gemacht und zeigt die Reflexion der solaren Röntgenstrahlung durch unseren Erdtrabanten. Gleichzeitig wirft dieser einen Schatten auf den kosmischen „Röntgenhintergrund“.

Insgesamt haben die ROSAT-Himmelsdurchmusterung und die Detailbeobachtungen eine Ernte erbracht, die in ihrer Quantität und Qualität alles in den Schatten stellt, was bisher mit abbildenden Röntgenteleskopen gefunden wurde (Trümper 1994).

DIE NATUR KOSMISCHER RÖNTGENQUELLEN

Mit der Entdeckung von mehr und mehr Röntgenquellen im Universum, viele von ihnen mit unvorstellbar hoher Energieproduktion, verfeinerten sich unsere Vorstellungen von den Lebenszyklen der Sterne. Frühere Generationen hielten den Sternenhimmel für einen Bereich überlegener Ruhe. Während der letzten Jahrzehnte lernten wir, daß der Kosmos erfüllt ist von unglaublich gewaltsamen Prozessen und Veränderungen. Manche von ihnen ereignen sich innerhalb von Bruchteilen von Sekunden.

Wir wissen heute, daß Sterne geboren werden, leben und sterben. Massearme Sterne wie unsere Sonne leben von der Kernfusion viele Milliarden Jahre und dämmern dann langsam in das Endstadium der Weißen Zwerge hinüber. Hingegen durchlaufen massereiche Sterne die nukleare Brennphase in wenigen Millionen Jahren, und am Ende bricht der ausgebrannte Kern in Bruchteilen einer Sekunde in sich zusammen, wobei die Atome ihre Identität verlieren: Die Elektronen werden in die Atomkerne gequetscht und verbinden sich dort mit den Protonen zu Neutronen. So entsteht ein Neutronenstern, ein riesiger Atomkern mit einem Radius von 10 Kilometern und einer Dichte von mehreren hundert Millionen Tonnen pro Kubikzentimeter. Die Existenz von Neutronensternen wurde in den dreißiger Jahren von Walter Baade und Fritz Zwicky vorausgesagt. Einige Jahre später zeigte J.Robert Oppenheimer, daß diese Idee richtig sein mußte. Aber es sollte noch lange Zeit, nämlich bis zum Jahr 1967, dauern, bis die Neutronensterne von Hewish und Bell als Radiopulsare entdeckt wurden.

Bei der Implosion des stellaren Kerns zum Neutronenstern wird soviel Energie freigesetzt, daß der restliche Stern durch eine gewaltige Explosion zerrissen wird. Derartige Supernovaexplosionen sind im Anfangsstadium so hell, daß sie in sehr entfernten Galaxien gesehen werden können. In späteren Phasen sind sie ausgedehnte Radio- und Röntgenquellen. In unserer Milchstraße sind etwa 200 Supernovaexplosionswolken, die innerhalb der letzten zigtausend Jahre explodiert sind, als heiße Feuerbälle und starke Röntgenstrahler zu bewundern. Abb. 8 zeigt als Beispiel den Vela-Supernovaüberrest -Alter 14 000 Jahre-, in deren Zentrum sich ein Neutronenstern, ein 89 ms Pulsar befindet. Neugeborene Neutronensterne besitzen extreme Eigenschaften: Da beim Kollaps Drehimpuls und magnetischer Fluß konstant bleiben, rotiert der Neutronenstern mit einigen hundert Umdrehungen pro Sekunde und sein Magnetfeld wächst auf Billionen Gauß an. Als Folge davon besitzen diese Sterne eine extreme Magnetosphäre, aus deren polaren Regionen ungeheuer intensive Bündel von Radiostrahlung emittiert werden, die als Folge der Rotation wie ein Leuchtfeuer den Raum durchstreifen. Dies sind die Radiopulsare, von denen wir heute über 500 kennen. Die jüngsten und aktivsten Pulsare strahlen auch Bündel von sichtbarem Licht, Röntgen- und Gammastrahlung ab. Dazu gehört zum Beispiel der berühmte Crabpulsar, der in der „chinesischen“ Supernovaexplosion des Jahres 1054 geboren wurde. Seine Röntgenstrahlung wurde bereits Ende der sechziger Jahre entdeckt. Abb. 9a und b zeigen eine optische und eine ROSAT-Aufnahme des Crabpulsars und des umgehenden Nebels, der im Synchrotronlicht extrem hochenergetischer Elektronen ($\approx 10^{15}$ eV!) leuchtet, die von dem Neutronenstern beschleunigt werden.

Da Neutronensterne heiß geboren werden, sollten sie auch aufgrund ihrer thermischen Strahlung im Röntgenbereich sichtbar sein, so lange sie heiß genug sind. Dies ist von besonderem Interesse, da sie im Licht der thermischen Strahlung von allen Richtungen sichtbar sind und nicht wie die Radiopulsare nur dann, wenn uns der Scheinwerfer des Leuchtfeuers trifft. Nachdem mit dem Einstein-Observatorium erste Andeutungen für diese thermische Röntgenstrahlung gefunden wurden, hat man mit ROSAT bisher 8 Neutronensterne gefunden, deren Alter zwischen 10 000 und 1 Million Jahre liegen und die Temperaturen von etwa einer Million Grad aufweisen. Ältere Sterne sind offenbar schon zu weit abgekühlt. Allerdings wurde mit ROSAT ein 5.75 Millisekunden-Pulsar entdeckt, der 2 Milliarden Jahre alt ist und immer noch einen heißen Fleck von über einer Million Grad Temperatur besitzt. Dies läßt vermuten, daß alte Neutronensterne durch die magnetosphärischen Prozesse, die zur Radiostrahlung führen, ständig nachgeheizt werden. Schließlich entdeckte ROSAT auch den ersten Pulsar, der nicht im Radiobereich sichtbar ist, sondern mit 237 Millisekunden Periode lediglich im Röntgen- und Gammabereich strahlt. Dieses merkwürdige Objekt mit dem Namen Geminga ist eine der hellsten Gammastrahlungsquellen am Himmel.

Besonders helle Röntgenquellen sind enge Doppelsternsysteme, bei denen Material von einem normalen Stern auf einen Neutronenstern übergeht. Wegen der ungeheuren Gravitation von 100 Milliarden „g“ beträgt die Fallgeschwindigkeit auf einem Neutronenstern etwa ein Drittel der Lichtgeschwindigkeit.

Zugleich wird das einfallende Material von den superstarken Magnetfeldern auf die magnetischen Pole gelenkt, wo Brennflecken entstehen, deren Temperatur über 100 Millionen Grad ist und deren Energieabstrahlung bis zum 10 000-fachen der Abstrahlung der Sonne beträgt. Dabei ist der Brennfleck weniger als 1 km² groß! Der gesamte Primärenergiebedarf von Deutschland wird hier auf einer Fläche erzeugt, die nur ein tausendstel Millimeter Durchmesser beträgt!

Diese extremen Objekte wurden in den frühen Raketenexperimenten entdeckt und von vielen Satelliten genauer studiert. UHURU-Messungen zeigten zum ersten Mal die Pulsationen, die auf die Rotation des Neutronensterns zurückzuführen sind, und Bedeckungen aufgrund der Bahnbewegung. Mit dem Ballonexperiment HEXE wurde zum ersten Mal das gigantische Magnetfeld eines dieser Objekte gemessen: Auf dem Neutronenstern Hercules X-1 herrscht eine Polfeldstärke von 5×10^{12} Gauß. Unter solchen Bedingungen steckt in einem Kubikzentimeter Vakuum soviel magnetische Energie, daß man damit die Stadt Würzburg für einige Jahre mit Energie versorgen könnte.

Aber es gibt auch Doppelsternsysteme, in denen relativ schwach-magnetische Neutronensterne sitzen. Zwar sind ihre Magnetfelder mit 10^8 bis 10^9 Gauß immer noch weitaus stärker als die stärksten Magnetfelder in irdischen Labors (10^6 Gauß), aber sie reichen nicht aus, um den gewaltigen Materieeinfall zu kanalisieren. Deshalb umfließt die einfallende Materie den Neutronenstern, und es bildet sich eine hochverdichtete Schicht, die im wesentlichen aus Wasserstoff und Helium besteht. Dabei kommt es -alle paar Stunden bis Tage- zu gewaltigen thermonuklearen Explosionen, deren Stärke viele Milliarden Tonnen TNT beträgt und die von gewaltigen Röntgenausbrüchen begleitet sind. Der erste „Röntgenburster“ wurde 1975 von dem niederländisch-amerikanischen ANS-Satelliten entdeckt und seitdem sind diese Ausbrüche mit vielen Röntgeninstrumenten studiert worden.

Wenn ein kollabierender Stern mehr als etwa drei Sonnenmassen besitzt, so wird die Implosion nicht im Stadium des Neutronensterns gestoppt, sondern geht weiter. Es entsteht ein Schwarzes Loch, dessen Gravitationsfeld so groß ist, daß nichts, selbst elektromagnetische Strahlung nicht seinem Schwerfeld entkommen kann. Der direkte Nachweis eines Schwarzen Lochs ist bisher nicht gelungen, aber einige Kandidaten sind bekannt, in vorderster Linie Cygnus X-1 im Sternbild des Schwans, eine sehr starke Röntgenquelle, die 1964 von der Friedman-Gruppe entdeckt wurde. Sie zeigt sehr rasche Schwankungen der Intensität. Durch optische Beobachtungen wurde ein Blauer Riesenstern als Begleiter und Materiespender identifiziert. Aus der bekannten Masse dieses Riesen, seiner Bahngeschwindigkeit im Doppelsternsystem, die mit dem Dopplereffekt gemessen wird, und aus der Umlaufperiode ergibt sich nach dem 3. Kepler'schen Gesetz die Masse des Röntgensterns. Sie ist mit 8 Sonnenmassen erheblich größer als die maximal mögliche Masse eines Neutronensterns, so daß es sich um ein Schwarzes Loch handeln dürfte. Dabei kommt die beobachtete Röntgenstrahlung natürlich nicht vom Schwarzen Loch selbst. Sie entsteht durch die extreme Kompression und Erhitzung der einfallenden Materie auf Temperaturen von einigen hundert Millionen Grad, bevor sie auf Nimmerwiedersehen verschwindet.

Mit den Röntgenteleskopen ist es auch möglich gewesen, die hellen Röntgenquellen in fernen Galaxien zu erfassen. Die Abb. 10a und b zeigen den Andromedanebel, der eine Entfernung von 2 Millionen

Lichtjahren besitzt, im sichtbaren und im Röntgenlicht. Während man im sichtbaren etwa 100 Milliarden Sterne sieht, zeigt das ROSAT-Bild 400 helle Röntgenquellen. Die meisten davon sind Röntgendoppelsterne, einige sind Supernovaexplosionswolken. Nichts verdeutlicht besser den Fortschritt der Röntgenastronomie als die Tatsache, daß ROSAT in dieser fernen Galaxie etwa ebensoviele Röntgenquellen fand wie UHURU und HEAO-1 in unserer Milchstraße!

Bekanntlich sind Galaxien räumlich nicht gleichmäßig verteilt, sondern ballen sich mehr oder weniger zu „Galaxienhaufen“ zusammen, bei denen es sich um die größten physikalischen Gebilde in unserem Kosmos handelt. Es war eine große Überraschung, als UHURU starke Röntgenstrahlung von diesen Objekten entdeckte. Weitere Untersuchungen zeigten, daß die Strahlung nicht von den Galaxien des Haufens stammt, sondern von einer heißen Plasmawolke, die eine Temperatur von zig Millionen Grad besitzt. Inzwischen wissen wir durch die Messungen vom Einsteinobservatorium und von ROSAT, daß diese Gaswolken Durchmesser von Millionen von Lichtjahren haben und Massen besitzen, die etwa fünfmal größer sind als die aller Haufengalaxien zusammengenommen. Um einen weiteren Faktor 3-4 größer ist jedoch die Masse, die vorhanden sein muß, um die heiße Plasmawolke durch ihre Gravitation zusammenzuhalten. Die Natur dieser unsichtbaren „Dunklen Materie“ ist vorläufig noch ungeklärt. Mit ROSAT wurde weiterhin festgestellt, daß viele Galaxienhaufen Strukturen zeigen, die auf Wechselwirkungs- und Vereinigungsprozesse hindeuten. So sieht man bei Abell 2256 (Abb. 11) ganz deutlich zwei Haufen, die aufeinanderprallen und in einigen Milliarden Jahren zu einem Gebilde verschmolzen sein werden. Diese Ergebnisse stützen sehr die Hypothese einer hierarchischen Strukturbildung im Kosmos, wonach die großen Strukturen durch die Vereinigung von kleineren Gebilden entstehen. Insgesamt enthält die ROSAT-Durchmusterung etwa 4 000 Galaxienhaufen; erste Messungen ihrer großräumigen Verteilung zeigen eine ähnliche Blasenstruktur wie die Verteilung von Galaxien. Aber während die optischen Galaxienmessungen „nur“ bis zu Entfernungen von zwei Milliarden Lichtjahren reichen, erstrecken sich die ROSAT-Messungen bis etwa 6 Milliarden Lichtjahre. Entfernung!

In noch größeren Entfernungen findet man die Quasare, die aussehen wie Sterne („Quasi-stellare“ Objekte), deren Rotverschiebungen aber auf Entfernungen bis 13 oder 14 Milliarden Lichtjahre hinweisen. Sie strahlen in allen Wellenlängenbereichen, vor allem auch im Röntgenbereich, gewaltige Energiebeträge ab. So emittiert der helle, relativ nahe Quasar 3C 273 soviel Energie wie 10^{14} Sterne oder 1 000 Galaxien. Gleichzeitig weist die zeitliche Variabilität daraufhin, daß die Strahlung aus einem sehr kleinen Volumen kommt, das nicht größer ist als einige Lichtwochen im Durchmesser. Man vermutet in Analogie zu den kompakten Röntgendoppelsternen, daß es sich hier um supermassive Schwarze Löcher handelt, die Materie ansaugen. Bei 3C273 muß die Masse des Schwarzen Lochs etwa 10^9 Sonnenmassen betragen, und das Monster verschluckt etwa eine Erdmasse pro Sekunde. Insgesamt sind heute tausende von Quasaren bekannt. Die meisten ROSAT-Quellen, nämlich etwa 25 000, sind Quasare, von denen allerdings erst ein kleiner Teil als solche identifiziert wurden.

ROSAT-Messungen zeigten auch, daß entfernte Quasare im wesentlichen die kosmische Hintergrundstrahlung im Röntgenbereich produzieren, die 1962 anstelle des Mondes entdeckt wurde. Um zu diesem Ergebnis zu kommen, wurde an einer Stelle im Sternbild „Großer Wagen“ die tiefste ROSAT-Beobachtung mit insgesamt 60 Stunden Meßzeit gemacht. Die Dichte der Röntgenquellen am Himmel beträgt dabei 400 pro Quadratgrad! Die Beobachtung zeigt, daß mindestens 75% der Hintergrundstrahlung von diskreten Quellen stammt. Nachbeobachtungen mit dem 5m-Spiegel auf dem Mt. Palomar-Teleskop zeigten, daß die meisten der schwachen Objekte Quasare sind. Zur Identifizierung der schwächsten ROSAT-Quellen werden allerdings die Teleskope der nächsten Generation gebraucht. Beobachtungen mit dem 8m-Keck-Teleskop auf Hawaii haben im Frühjahr 1994 begonnen.

Alle diese exotischen astronomischen Objekte - Supernovae, X-ray Busters, Neutronensterne, Pulsare, Quasare und Schwarzen Löcher - haben einen Zug gemeinsam: Sie emittieren große Mengen von Röntgenstrahlen. Zum Glück sind alle weit von unserer Erde entfernt. Befände sich z.B. die Röntgenquelle Sco XR-1 an der Stelle unserer Sonne, statt in einer Entfernung von 800 Lichtjahren, so würde unsere Erde eine Röntgendosis von 2 000 Kilowatt Leistung auf jeden Quadratmeter erhalten - ein Betrag, der sofort die Atmosphäre zerstören und allein schon dadurch die Entstehung und Erhaltung von Leben unmöglich machen würde!

Die Arbeit der Röntgen-Astronomen während der vergangenen 35 Jahre war ein höchst interessantes und erfolgreiches Zusammenspiel zwischen den kosmischen Röntgenquellen und den irdischen Forschern: die Existenz der Röntgenquellen bot einen starken Ansporn für die Entwicklung immer besserer Beobachtungsmethoden, und die besseren Instrumente wiederum setzten die Forscher in die Lage, mehr und mehr wichtige Einzelheiten über Röntgenstrahlen aus dem Universum zu erkunden.

AXAF UND XMM, DIE GROßEN RÖNTGENOBSERVATORIEN DER ZUKUNFT

Am Ende der neunziger Jahre sollen zwei große Röntgenobservatorien gestartet werden, die ganz verschiedene Eigenschaften haben und sich gegenseitig ergänzen. AXAF (Advanced X-ray Astrophysics Facility) ist ein Projekt der NASA, das ein großes Röntgenteleskop sehr großer Auflösung (0.5 Bogensekunden) trägt und auch spektroskopische Untersuchungen hoher Auflösung machen kann. Sein Gegenstück ist XMM (X-Ray Multi-Mirror Mission) der europäischen Weltraumbehörde ESA. Es besitzt nur eine mittlere Auflösung (20 Bogensekunden), aber eine sehr große Sammelfläche, die Untersuchungen der Spektren und Zeitvariationen sehr schwacher Quellen ermöglicht. In beiden Missionen kommen Wolterteleskope zum Einsatz, beide sollen eine lange Lebensdauer besitzen und allen Wissenschaftlern offenstehen.

Das AXAF-Teleskop wird bei einem Durchmesser von 120 cm vier ko-axiale Paraboloid-Hyperboloid-Paare von Wolter-Spiegeln enthalten und eine Brennweite von 10 Metern besitzen. Alle acht Elemente

des Teleskops sollen 1995 fertiggestellt sein. Sie werden im NASA-Marshall Space Flight Center unter der Leitung eines der Autoren (M.W.) geprüft und kalibriert; der Start von AXAF ist für Ende 1998 geplant. Sein Teleskop wird mit zwei Arten von abbildenden Detektoren ausgestattet sein, einem „Multi-Channeltron“ ähnlich dem Channeltron auf ROSAT, und einem CCD, einem Röntgen-empfindlichen „Charge-coupled Device“, wie er für sichtbares Licht in Camcorders verwendet wird. Dazu wird AXAF zwei Dispersionsgitter enthalten zur Analyse des Energiespektrums der Röntgenquellen; die Gitter werden in Gemeinschaftsarbeit zwischen dem Max-Planck-Institut (MPE) in Garching und dem Laboratory for Space Research in Utrecht gebaut. AXAFs Fähigkeit, Objekte geringer Intensität zu entdecken, wird die seiner Vorgänger erheblich übertreffen; seine Auflösung bei der Analyse von Spektren wird um den Faktor 10 besser sein.

XMM wird 3 große Wolterspiegelsysteme mit 8 Metern Brennweite besitzen, von denen jedes aus 58 (!) ko-axialen Schalen besteht. Die wissenschaftliche Betreuung dieser Spiegel liegt beim MPE, das auch die Kalibration der Spiegel und später der vollständigen Teleskope in seiner Röntgentestanlage durchführt. Zwei der Teleskope werden mit CCD's der University of Leicester und Röntgenspektrometern aus Utrecht bestückt. Das dritte Teleskop wird im Fokus eine ganz neuartige Röntgen-CCD-Kamera besitzen, die sich von den sonst üblichen CCD's durch eine besonders große Effizienz bei hohen Energien - bis 15 keV - und eine exzellente Zeitauflösung unterscheidet. Bei diesem Detektor handelt es sich um eine Spezialentwicklung des MPE. XMM soll 1999 in einen hochexzentrischen Orbit gestartet werden, der Erdabschattungen vermeidet und dadurch lange ununterbrochene Beobachtungszeiten ermöglicht.

Von AXAF und XMM sind wichtige neue Impulse für den Fortschritt der Astrophysik zu erwarten, da sie ganz neue Meßmöglichkeiten bieten. Auf einige der Fragen wird im folgenden eingegangen.

FRAGEN DER KÜNFTIGEN RÖNTGENASTRONOMIE

Da die Röntgenstrahlung von der heißen Oberfläche von Neutronensternen (Radiopulsaren) sehr schwach ist, kann man mit ROSAT nur wenige nahe Objekte studieren. Die Sammelfläche von XMM wird es erlauben, erheblich schwächere d.h. entferntere Objekte zu sehen. Gleichzeitig sollten die Spektrometer auf XMM es ermöglichen, Spektrallinien und Absorptionskanten in den Röntgenspektren zu finden, aus denen auf die Zusammensetzung der Neutronenstern-Oberfläche geschlossen werden kann. Nach den theoretischen Vorstellungen sollte es sich dabei im wesentlichen um Eisen handeln. Wegen der starken Magnetfelder erwartet man starke Verschiebungen der Spektrallinien, also einen extremen Zeemaneffekt. Derartige Untersuchungen sollten interessante Aufschlüsse über die Beschaffenheit von Neutronensternen und das Verhalten der Materie bei extrem großen Dichten liefern.

Erhebliche Fortschritte werden auch bei Untersuchungen an Galaxienhaufen erwartet. Die sehr hohe räumliche und spektrale Auflösung von AXAF und die große Sammelfläche und spektrale Auflösung von XMM werden es ermöglichen, die räumliche Verteilung der Temperatur und der Elementhäufigkeiten in Galaxienhaufen zu bestimmen. Falls alle schweren Elemente in Sternen entstehen, dann sollten AXAF- und XMM-Studien von weiter entfernten, und daher jüngeren Galaxienhaufen Anzeichen einer Evolution ergeben, da jüngere Sterne weniger Zeit hatten, schwere Elemente zu entwickeln. Eine wichtige Frage beim Studium der Galaxienhaufen betrifft das Aufheizen und Abkühlen des Gases, das sich in Galaxienhaufen findet. Die Art und Weise, wie sich intergalaktische Gase abkühlen, hat große Bedeutung für die Sternbildung, bei der große Mengen von Gas genügend Wärmeenergie verlieren müssen, bevor sie unter ihrer eigenen Schwerkraft kollabieren können.

Ein anderes grundlegendes Problem, dem sich die Röntgen-Astronomie zuwendet, ist der Entfernungsmaßstab des Universums, sowie auch sein Alter und sein weiteres Schicksal. Das Hubble-Teleskop wird Entfernungsmessungen hoher Genauigkeit ermöglichen, aber nur bis zu relativ begrenzten Entfernungen. Eine grundsätzlich neuartige Methode der Messung kosmischer Entfernungen ergibt sich aus einer Verbindung von Röntgen-Studien von Galaxienhaufen mit erdgebundenen Mikrowellen-Beobachtungen an der kosmischen 2.7 k-Hintergrundstrahlung. Diese Strahlung gilt als Relikt des Urknalls und erfüllt den ganzen Kosmos gleichförmig. Dort wo die Mikrowellenstrahlung auf Galaxienhaufen trifft, wird sie durch das heiße Plasma etwas aufgeheizt, d.h. sie erfährt eine geringe Temperaturerhöhung. Dieser Sunyaev-Zel'dovich-Effekt kann in Kombination mit Röntgenbeobachtungen des Galaxienhaufens zur Bestimmung seiner Entfernung und damit der Hubble-Konstante dienen. Da die Röntgen- und auch die Mikrowellen-Beobachtungen bis zu sehr großen Entfernungen durchgeführt werden können, bietet sich hier die erste Gelegenheit, die Hubble-Konstante als Funktion der Entfernung zu messen. Erste Ergebnisse, die mit ROSAT und ASCA an nahen Haufen gewonnen wurden, liegen bereits vor. AXAF und XMM sollten es ermöglichen, Änderungen in der Hubble-Konstanten mit einer Genauigkeit von 20 Prozent zu ermitteln; diese Genauigkeit würde eine Entscheidung zwischen einem „offenen“ und einem „geschlossenen“ Universum ermöglichen. Ein „offenes“ Universum ist in unbegrenzter Expansion begriffen, die mit dem einmaligen Urknall begann und nie aufhören wird. Ein „geschlossenes“ Universum wird sich so lange ausdehnen, bis seine inneren Gravitationskräfte die beim Urknall erhaltene Expansionsgeschwindigkeit so verlangsamt haben, daß schließlich eine Kontraktion beginnt, die zu einem „Endkollaps“ führt. Unsere heutigen Kenntnisse lassen nicht entscheiden, welche dieser Möglichkeiten für unseren Kosmos zutrifft. Zukünftige Forschungen mit Röntgensatelliten sollten helfen, diese Fragen zu klären.

Mit AXAF und XMM sollte es auch gelingen, genaueres über die „Dunkle Materie“ zu erfahren.

Man weiß, daß diese Materie vorhanden ist, in Galaxien, in Galaxienhaufen, und in Haufen von Haufen, den sogenannten Superhaufen. Aber es ist unklar, ob es sich dabei um Neutrinos, exotische Elementarteilchen, Planeten oder Wackersteine handelt. Das sehr heiße Gas, wie es in Abb. 11 zu sehen ist, und das nur auf Röntgenbildern gesehen werden kann, wird offenbar durch Gravitationskräfte der dunklen Materie zusammengehalten, denn das beobachtbare Material in den Galaxien ist dazu nicht in der Lage. Aus sorgfältigen Beobachtungen des heißen Gases kann die Struktur des Gravitationsfeldes ermittelt werden, die wiederum von der Masse und Verteilung der dunklen Materie abhängt; auch auf ihre Zusammensetzung können daraus Schlüsse gezogen werden.

Schließlich könnten die Observatorien der Zukunft wie AXAF und XMM auch direkte Messungen der Röntgenemission von exotischen Kandidaten dunkler Materie ermöglichen, wie der Schwarzen Löcher, oder auch der eindimensionalen Diskontinuitäten, die von den Theoretikern „Strings“ genannt werden. Möglicherweise wurden die Strings während der frühen Lebensphasen des Universums gebildet, als einer der Grundbausteine des Universums. Falls die Strings, wie angenommen wird, Supraleiter sind, dann könnte ihre Bewegung durch die Dunkelmaterie in Galaxien oder Galaxienhaufen eine Emission von Röntgenstrahlen bewirken, die vielleicht von AXAF oder XMM entdeckt wird. Wahrscheinlich aber wird man etwas ganz anderes finden. Die Geschichte der Astronomie und Kosmologie ist voller Überraschungen; denn neue Beobachtungsmöglichkeiten haben stets unerwartete Ergebnisse gebracht. Dafür legt auch ganz besonders die Entwicklung der Röntgenastronomie in den letzten Jahrzehnten Zeugnis ab.

Wir wissen nicht, ob aus den Erkenntnissen dieser neuen Wissenschaft jemals Nutzenwendungen erwachsen werden. Aber zweifellos hat sie wichtige technologische Impulse gebracht, so für die Herstellung extrem genauer Spiegeloberflächen. Der eigentliche Wert jedoch liegt in den neuen Erkenntnissen über unseren Kosmos. Über ihn haben wir viel durch die Röntgenstrahlung gelernt. Aber vieles liegt noch im Dunkel. So ist in den Röntgenstrahlen aus dem Universum etwas von jenem Geheimnis bewahrt, mit dem Wilhelm Conrad Röntgen vor hundert Jahren seine Zeitgenossen in Erstaunen und Bewunderung versetzt hat.

ABBILDUNGEN:

- 1) YOHKOH („Sonnenstrahl“), ein japanisch-amerikanisch-britischer Röntgensatellit für Sonnenbeobachtung, 1991 (Ref. 5).
- 2) Emission weicher Röntgenstrahlen von der Sonne; a) während einer „aktiven“ Periode, b) während einer „ruhigen“ Periode, 18 Monate später.
YOHKOH, 1991 (Ref. 5).
- 3) ROSAT-Aufnahme des Mondes; die von der Sonne bestrahlte Mondhälfte reflektiert Röntgenstrahlen von der Sonne; die dunkle Mondhälfte absorbiert die diffuse Röntgenhintergrundstrahlung aus dem Raum.
ROSAT, 1992 (Ref. 10).
- 4) Himmelskarte mit 846 Röntgenquellen, HEAO 1, 1984 (Ref. 1).
- 5) ROSAT, ein deutsch-amerikanisch-britischer Satellit zur Durchmusterung des Röntgenhimmels, 1990 (Ref. 10).
- 6) Himmelskarte mit 50 000 Röntgenquellen, ROSAT, 1992 (Ref. 10).
- 7) Ausschnitt aus der Sagittarius-Region nahe dem galaktischen Zentrum im Röntgenlicht; helle Punkte sind Röntgendoppelsterne, schwächere Punkte sind normale Sterne. Rechts die Kepler Supernova vom Jahre 1604. Diffuse Röntgenemission von heißen interstellaren Gasen (1 Million Grad Kelvin). ROSAT, 1992 (Ref. 10).
- 8) Röntgenbild der Supernova-Explosionswolken in den Sternbildern Vela und Puppis (oben rechts). Im Zentrum des Vela-Supernova-Überrests ist der Vela-Pulsar zu sehen, der eine Periode von 89 Millisekunden besitzt (Ref. 9).
- 9) Crab-Nebel, a) im sichtbaren Licht, b) im Röntgenlicht, mit zentralem Pulsar und diffuser Röntgenemissions-Region. ROSAT (Ref. 10).

- 10) Andromeda-Galaxie, M 31; a) im sichtbaren Licht (Celestron International), b) im Röntgenlicht; ROSAT entdeckte etwa 400 einzelne Röntgenquellen im Andromedanebel (Ref. 10).
- 11) Zwei Galaxienhaufen in Kollision, Abell 2256, ROSAT, 1992 (Ref. 10).
- 12) AXAF Röntgensatellit, vermutlicher Start im Jahre 1998. (Ref.: Neal V; NASA-MSFC; NASA-OSSA; Smithsonian Astrophys. Ob., US Govt Print Off, EP 199, Washington, DC).
- 13) Röntgenobservatorium XMM der European Space Agency, voraussichtlicher Start 1999.

LITERATUR

- (1) Friedman H (1990), The Astronomer's Universe, W W Norton & Company, New York
- (2) Giacconi R et al (1962), Phys Rev Lett 9, Seite 439
- (3) Giacconi R (1971), Astrophys J 165, L27
- (4) Giacconi R (1979), Astrophys J 230, Seite 540
- (5) Petersen G C et al (1993), Sky & Tel Sept 1993, Seite 20
- (6) Stuhlinger E (1970), Röntgen-Astronomie, Röntgenstrahlen - Aus der Welt der medizinischen Radiologie, Heft 23, Seite 2, C H F Müller, Hamburg
- (7) Trümper J E et al (1978), Astrophys J 219
- (8) Trümper J E et al (1990), Phys Bl 46, Seite 197
- (9) Trümper J E et al (1993), Science, Vol 260, Seite 1769
- (10) Trümper J E (1994), Phys Bl 50, Seite 35
- (11) Wolter H (1952), Annal Phys 10, Seite 52

55643

X-ray from the universe.

When Wilhelm Conrad Roentgen discovered his radiation one hundred years ago, it seemed that it was discovered one of the rarest and most volatile members of the family of the basic modules of our natural world. Today report the cosmologists that a substantial part of the gigantic radiation energy consists in the universe of X-ray, which ~~by hurry~~ cosmic spaces with speed of light.

through

1125